

논 평

지하수댐 물막이벽 시공법과 해안지역 염수침입 방지기술 개선 방안

The Study on Constructing Underground Wall to Prevent Seawater Intrusion on Coastal Areas

부 성 안(Seong, An Booh)	농업기반공사 농어촌연구원 지하수연구실
이 기 철(Ki, Churl Lee)	농업기반공사 농어촌연구원 지하수연구실
김 진 성(Jin, Sung Kim)	농업기반공사 농어촌연구원 지하수연구실
정 교 철(Gyo, Cheol Jeong)	안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과
고 양 수(Yang, Soo Ko)	한국수자원공사 조사기획처 지하수사업부

요약 / ABSTRACT

지하수댐은 대용량의 지하수를 효과적으로 확보할 수 있는 시설로서 저류수는 유역조건과 대수층조건, 상류부 오염원 분포와 수질에 따라 상수도용, 중수도용, 농업용 또는 공업용 등으로 다양하게 이용할 수 있으므로 적절한 지하수댐 설치 방법은 용수부족을 해결할 수 있는 주요 기술의 하나이다.

지하수댐을 활성화시키기 위해서는 대수층 위치 및 지층에 맞는 적절한 차수공법의 선택과 정밀한 물막이벽 시공, 대수층 구조·수문·불수지 등의 정확한 분석, 장기적인 지하수 이용계획과 저류역내 수질보전대책 수립, 수위·수질에 대한 장기 모니터링 실시로 지속적인 유지관리, 지속가능한 대용량 취수기술에 대한 조속한 연구, 지하수댐 개발로 인한 주변환경에 미치는 영향에 대한 철저한 분석 및 대책 수립 등이 필요하다.

그리고 해안지역 지하수댐에서 발생하는 염수침입 현상을 방지하는 방안으로 물막이벽을 이중으로 설치하는 방법이 있다.

주요어 : 지하수댐, 지하댐, 물막이벽, 염수침입

Groundwater Dam is one of the reliable techniques to get huge amount of groundwater abstraction for municipal, agricultural, drinking, industrial water supply system. It can be a major technique to solve water shortage problems when it based on the sufficient watershed, proper topology, and adequate aquifer distribution and pollution control.

Groundwater Dam had initiated its construction by RDC(former KARICO) in early eighties in Korea and 4 of it in total were added more until late eighty. However, this technique has shrunken

its application due to gradually decreased yield rate after several years of construction. After we studied several existing sites precisely, we concluded that the main reason of decreasing yield rate was come from engineering roughness on construction in early nineties. Theoretically, the technique itself seemed to be little defectives however, there were a little application in the fields in Korea.

With the recent advance in engineering fields, those defects in construction would be no longer obstacle to construct underground wall and the technique could be a one of major ground water production technique in the future.

It is essential to study following items thoroughly before select the appropriate site. The topography and the site of the underground wall, aquifer distribution, the specific technique for wall construction to block groundwater flow effectively and strict quality control during construction are critical. The surface and ground water monitoring data should be collected. Sustainability of the Groundwater Dam with huge groundwater abstraction in long term should be based on the long-term water balance analysis for each site. The water quality, environmental effect analysis and maintenance schedule should be also analyzed and planned in prior.

It is suggested that the two consecutive underground wall in the coastal area to prevent seawater intrusion beneath a single wall.

Kew Words : groundwater dam, subsurface dam, underground wall, seawater intrusion

서론

물은 생명의 기원이며 생존 필수요소로서 인간은 충분한 때는 절대성을 못 느끼다가 부족할 때가 되어서야 뒤늦게 그 절실함을 깨닫는 우를 범하기 쉽다.

우리나라는 물 공급을 주로 지표수에 의존하였으나, 좁은 국토로 인한 댐 적지 부족과 댐에 의한 용수공급의 한계, 지표수의 오염, 수물지의 생태계 파괴에 따른 환경오염 가속화 등으로 지표수 개발은 한계에 도달하고 있으며, 물 소비량은 급증하는 추세로 지하수자원의 효용가치는 점점 더 커지고 있다. 진교부(2001)의 지하수조사연보에 따르면, 2000년 말 기준 우리나라의 연간 지하수 개발가능량은 133억 m^3 으로 수자원총량의 10.5%이고 지하수 이용량은 물 이용량의 10.3%, 지하수 개발가능량의 23.2%인 31억 m^3 (염지하수 제외)으로 개발가능성이 큰 자원이며, 해마다 이용량은 점차 증가하는 추세이지만 아직도 미국, 대만, 프랑스, 일본 등 보다 매우 적은 양을 사용하고 있다 (Table 1).

Table 1. Groundwater use in major countries
(Unit : 100 million m^3/Y)

Item	U.S.A	Taiwan	France	Japan	R.O. Korea
Total available water(A)	63,980	900	4,400	4,200	1,267
Total use(B)	4,705	191	370	891	301
Groundwater use(C)	1,055	42	70	143	31
Ratio(C/B)(%)	22.4	22.0	18.9	16.0	10.3
FY	1995	1983	1981	2000	2000

우리나라의 연간 강수량은 1,274mm로써 세계의 연 평균 강수량 973mm보다 많은 편이나 연중 강수량의 2/3가 여름에 집중되어 내리며 하천의 경사가 급하여 지하에 충분히 저장되지 못하고 단기간에 많은 양이 바다로 유출되어 버리는 까닭에 가용 강수량이 매우 적다(한정상, 1998). 일부 전문가들은 예측하기를 2006년부터 물 부족 현상을 겪기 시작하고 그 부족량이 2011년에는 연간 18억 m^3 에 이르러 사회·경제적 혼란이 우려된다고 한다. 우리나라를 향후 물 부족 국가로 예측하는 근거에는 현재와 같은 수준의 수자원 관리를 기초로 하고 있다. 하지만 우리나라는 평균 강수

량으로 볼 때 충분한 수자원이 있다고 볼 수 있으므로 이를 적절히 이용 관리한다면 물 부족국가에서 벗어날 수 있다고 판단된다.

1936년 농업용수의 개발을 목적으로 한 최초의 소구경 시추 및 착정이 이루어진 이후, 국내에서의 본격적인 지하수 개발은 농업용수 공급을 목적으로 1960년대에 이루어진 층적층지하수 개발이며, 육지부에서는 1967년에 처음으로 경남 진례 지구에서 암반지하수를 개발하였고(농어촌진흥공사, 1996a), 2000년까지 1,077,697공에서 연간 약 3,096백만m³을 개발하여 사용하고 있으나 산업구조의 급격한 변화와 경제의 고도 성장과 함께 생활 및 농·공업용수 수요의 급증으로 인해 지하수 개발이 더욱 증가하고 있다.

1980년대 중반부터 산업발전과 더불어 층적층 지하수 개발에서 암반지하수 개발로 전환되었다. 암반지하수 개발 초기에는 지표에서 100m 이내의 대수층을 개발 사용하였으나, 최근에는 지하수이용량 증가로 국지적으로는 수위강하가 발생하고 있으므로, 향상된 물리탐사 기술과 성능이 우수한 개발장비를 활용하여 심도 300m 내외 혹은 그보다 더 깊은 곳에 형성된 대수층에서 지하수를 개발하고 있다. 또한 대용량의 용수를 취수하기 위하여 집수암거, 방사상집수정, 지하수댐 등의 건설이 활발히 이루어졌으며, 최근에는 하천변의 층적대수층을 이용하여 갈수기에 이를 채수하여 안정적으로 이용하는 방법이 연구 개발되고 있다. 그러나 지역별 대수층 평가와 물수지 분석이 결여된 상태에서 행해지는 지하수 개발심도와 사용량의 증가로 인하여 대수층 파괴 및 수질오염 현상이 날로 확대되고 있으며 특히 과거에 시공한 층적층지하수 관정과 농촌에서 주로 개발 이용하고 있는 풍화대에 형성된 지하수를 이용하는 소구경 지하수 관정에 의한 심각한 수질오염악화에 대한 대책수립의 필요성이 점차 제기되고 있다. 그러므로 환경친화적이고 지속가능한 지하수 개발이 이루어질 수 있는 지하수 함양/저류 공법과 대용량 취수공법의 개발이 시급하다 하겠다.

본 연구는 최근에 와서 층적층지하수를 대용량의 취수원으로 개발하기 위한 연구가 급속히 진행되고 있는 현실을 감안하여 1980년대 초 추진된 바 있었던 지하수의 다량 저류와 안정적인 취

수에 가장 큰 역할을 할 수 있는 지하수댐의 개발·이용현황을 알아보고 해안지역에서의 염수침입 방지기술에 대한 개선방안을 제시해 보고자 한다.

지하수댐의 정의 및 분류

지하수댐의 정의

일본에서는 지하수 흐름을 차수하기 위해 지중의 일부를 굴착하고 점토 등으로 치환하여 벽체를 시공하는 것을 오래전부터 실시하여 왔으며, 아이찌현 카스가이시(愛知縣 春日井市) 근교에서는 1930년경에 길이 330m, 층후 8m의 점토로 물막이벽을 구축한 사례가 있다. 그러나, 본격적인 지하수댐이 구체적인 형태로 제안된 것은 1964년에 교토대학의 마쓰오신이찌로(松尾新一郎) 교수가 지중댐에 대한 구상을 발표한 것이 최초이다. 이 제안을 최초로 적용한 사례는 1973년 나가사키현 노모사키에 속하는 가바지마(樺島, Kabajima)의 상수도 수원으로서 지하대수층에 지하물막이벽(지수벽 혹은 차수벽이라고도 함, 이하 물막이벽)을 구축한 것이 일본 최초의 지하수댐이 되었다. 대수층은 깊이 10m 전후의 점토 혼재의 층적사력층이고, 취수량도 1일 300m³으로서 소규모이었으며 또한 당초 시공한 물막이벽은 지수효과가 불충분하였기 때문에 1980년에 상류에 새로운 물막이벽을 건설하였다.

우리나라에서 지하수댐이란 용어는 농업진흥공사가 1982년 이안지하수댐 조사시험 보고서에서 처음 사용하였으며, 이러한 어원은 일본에서 사용된 것과 마찬가지로 지상에 설치하는 지상댐과 대비하여 물막이벽을 지하에 설치하기 때문인 것으로 추정된다.

Hanson과 Nillson(1986)은 「인공적인 차수벽 시설을 통해 지하수를 저장하는 모든 방식」을 지하수댐(groundwater dam)이라 하였으며, 이에 는 지표면 하부에 차수벽을 시공하여 지하수를 저장하고 이를 양수하여 사용하는 방식의 지하수댐(subsurface dam)과 계곡과 같이 주변에 비해 낮은 지표면 위에 지지력이 있는 댐을 시공한 후 댐에 의해 확보된 공간을 모래와 같은 투수성 물질

로 채운 후 물을 저장하고 이용하는 방식의 모래 저장댐(sand storage dam)의 두종류가 있으며 가끔씩 이 두 종류를 병용하여 설치하기도 한다 하였다. 일본 농업토목기술사전에는 「지하의 공급율이 큰 지층에 지수벽을 설치하여 지하수의 흐름을 정지시켜 저류하고, 지하수를 안정적으로 이용 가능하게 하는 시설」을 지하댐(subsurface dam)으로 정의하고 있다(吉田健治, 2000).

지하수댐을 구성하는 주 요소는 물막이벽과 대수층의 두 가지가 있다. 협의의 지하수댐은 지중에 구축하는 물막이벽 본체만을 말하는 경우도 있고, 또 보다 넓은 의미로서는 지하의 대수층을 포함하는 경우도 있다. Hanson과 Nillson이 지하수를 저장하는 형태에 따라 지하수댐을 크게 두 종류로 구분한 것은 협의의 지하수댐이라 할 수 있다.

본 연구에서는 지하수댐을 물막이벽은 물론 지하수를 공급하는 유역 및 대수층, 취수와 배수시설 등을 포괄적으로 포함시키고자 한다. 또한, 지표상에 설치하여 지표수를 사용하고 있는 댐(혹은 저수지)에 대비되는 용어로 지하댐이라 하는 것보다는 주로 지하수를 이용하는 댐이므로 「지하수댐」으로 정의하고자 하며, 취수시설을 제외하고 물막이벽 구간만을 지칭할 경우를 지하댐(underground dam, subsurface dam)이라 하고자 한다. 다만, 국내외에서 지하댐이 고유명사화된 지구 명칭은 당초대로 인용하였다.

지하수댐의 분류

지하수댐은 지하수 저류형태 외에도 용수 사용 목적, 축조목적, 물막이벽의 설치형태 및 시공방법 등에 따라 구분할 수 있다. 실제로 지하수댐은, 단일 시공방식에 따라 건설되는 경우보다는 구간별로 지하 매질의 특성을 조사하여 가장 적합한 시공방식을 선택하는 경우가 더 효과적이다.

저류형태에 따른 분류 ; 지하수댐은 일반적으로 자연적인 지표면 하부에 물막이벽을 시공하여 지하수를 저장하고 이를 양수하여 사용하는 방식의 완전지하저류형과 일부지표저류형 및 지상댐 병용형이 있다.

완전지하저류형은 지하수의 지표노출이 없는

형태로 물막이벽의 정부가 지표면 하부에 위치하도록 설치된다. 우리나라에서 현재까지 설치된 지하수댐은 모두 이 방식에 해당된다. 일부지표저류형은 대부분의 지하수를 지표면 하부에 저장시키지만 상대적으로 낮은 지표부위에서는 지하수가 지표로 방출되는 형태로써 모래 저장댐(sand storage dam)이 대표적인 예이다. 또한, 하천의 하상부에 물넘이를 설치한 보(weir)의 경우도 이 형태에 해당된다. 지상댐 병용형은 일반적인 지상댐과 같이 평상시에는 지상의 저수지에 물을 저류시켜 사용하고 이 저수지의 물이 고갈되면 지하수를 이용하는 방식으로 주로 사막 지역에서 사용하는 방식이다.

사용목적에 따른 분류 ; 지하수댐은 용수의 사용 목적에 따라 상수도용, 농업용 외에도 2가지 이상의 용도로 사용되는 복합목적용 등으로 구분할 수 있다. 상수도용으로는 쌍천지하댐이 있고, 농업용으로는 이안지하댐 등 5개가 있다. 현재까지는 복합목적용으로 개발된 곳은 없으나 앞으로는 지역에 따라 여러 목적의 용수공급이 매우 필요해질 것이다.

축조목적에 따른 분류 ; 지하수댐은 축조목적에 따라 수위상승형, 염수침입방지형 및 복합형으로 구분할 수 있다. 수위상승형은 지중에 설치된 물막이벽에 의해 지하수 흐름을 차단하고 지하수위를 상승시켜 저류량의 증대를 기대하는 것으로서 상승한 지하수 자원을 이용하는 것을 목적으로 한다. 염수침입방지형은 일반적으로 지하수위가 높아 지하수량은 풍부하나 대량 취수시 해수침입이 우려되는 해안선 부근에 설치하여 지하수 양수에 의한 염수침입방지를 주 목적으로 한다. 염수침입방지형 지하수댐 중에 있어서도 지하수위를 상승시키는 효과를 갖는 것을 복합형 지하수댐이라고 부르기도 한다.

국내에 시공된 여섯개 지하수댐의 축조목적은 저류량의 증대가 주 목적이다. 다만 물막이벽 설치 위치가 해안에 인접한 남송지하댐과 쌍천지하댐의 경우 벽체 설치 후 하류부의 수위강하로 인하여 염수가 침입할 수 있으므로 염수침입방지는 2차적인 목적을 갖게 된다. 그러므로 이 두 지

하수댐은 염수침입방지형이라 하기보다는 복합형이라 부르는 것이 더 적당할 것이다.

물막이벽 설치형태에 따른 분류 ; 설치형태별로는 물넘이형과 유출억제형으로 구분할 수 있다.

물넘이형은 지하수가 완전히 차수되도록 물막이벽을 설치하여 대수층에 최대한 많은 지하수를 저장하는 방식으로 남은 물은 물막이벽의 정부를 월류하여 하류부로 유출되도록 하는 형태를 말한다. 유출억제형은 물막이벽이나 벽체 하부를 통하여 어느 정도 지하수가 유출될 수 있도록 하지만 유출에 걸리는 시간을 지체시켜 필요한 시기에 지하수를 이용하고자 하는 목적으로 시공되는 형태이다. 이안지하댐은 시공시 물막이벽을 하부의 풍화대층과 기반암층에는 시공하지 않고 층적층인 사력혼전석층까지만 시공하였으므로 지하수의 완전차수를 기대할 수 없는 유출억제형에 해당된다고 볼 수 있다.

물막이벽 시공공법에 따른 분류 ; 일반적으로 치환공법형, 주입공법형, 교반혼합처리공법형, 타입공법형 등으로 구분할 수 있다.

치환공법형 지하수댐은 물막이벽 시공 구간을 굴착한 후 이 부분에 철근콘크리트 혹은 점토 등으로 치환시키는 방식의 지하수댐을 말한다. 이 공법으로는 완전 차수가 가능하나 심도가 깊어질수록 시공이 어렵고 공사비가 급격히 증가하는 단점이 있다. 주입공법형 지하수댐은 보통 그라우팅이라고 말하는 방식으로 물막이벽을 시공한 것을 말한다. 그라우팅은 시공심도에 제한을 받지 않으나 물막이벽과 기반암과의 밀착이 가능한 반면 정밀한 설계와 시공이 요구된다. 교반혼합공법형은 원위치 지반을 시멘트 밀크 등과 혼합·교반함으로써 차수벽을 형성시키는 공법이다. 강재 혹은 목재 등을 타입하여 지하수 유동을 차단하는 방식을 타입공법형 지하수댐이라 한다. 이 공법으로는 연약지반에서 연속적인 시공이 가능하나 심도가 깊어지거나 전석층에서는 시공이 매우 어려운 단점이 있다.

물막이벽 시공법과 재료

물막이벽 시공공법

치환공법 ; 이 공법은 물막이벽 설치 예정지의 지반을 굴착하고 차수재를 채워 넣는 방법으로서 굴착장비로 직접 지반을 굴착하는 개착식공법(open cut method)과 몰과 압축공기로 지반을 굴착하는 Jet Grout 공법, 지중연속벽공법으로 크게 구분할 수 있다.

개착식공법은 물막이벽 설치 심도가 얇은 경우 지표로부터 직접 굴착한 후 벽체를 설치하는 방법으로 굴착시 용수처리가 가능한 경우에 사용할 수 있다. 본 공법의 장점은 비용이 매우 저렴하다는 점이다. 우리나라에서는 심도 5m를 기준으로 그 이하일 때는 치환공법을 그 이상일 때는 주입공법을 사용하는 것이 경제적이다 하였으나(농어촌진흥공사, 1996b) 일본에서는 개략 심도 10m까지 이 공법을 사용하고 있으며 굴착심도가 10~20m로 다소 깊은 경우 수위저하공법을 병용하여 개착이 가능한 경우에는 공사비를 비교검토 하여 시공하고 있다. 물막이벽의 재료로는 점토·차수시트·모르터·철근콘크리트 등이 주로 사용되는데 현장조건과 경제성을 고려하여 최적의 재료를 선택하는 것이 좋다. 지층 중 사력혼전석층이 두껍게 발달하여 있을 경우에는 굴착이 어려워 공사비가 높아지는 단점이 있다. 이 공법으로 전북 고천지하댐과 우일지하댐이 시공되었는데 각각 철근콘크리트와 점토를 재료로 사용하였다.

Jet Grout 공법은 공기와 물의 힘으로 지반을 굴착 후 배출시켜 생긴 공간에 차수재를 충전시키는 공법이며, SIG(Super Injection Grout) 공법도 Jet Grout 공법의 일종이다. Jet Grout 공법은 수압파쇄현상이나 지반용기현상을 일으키지 않는 장점이 있다.

지중연속벽공법은 등단면의 벽체를 연속하여 시공하는 것으로 길이 5~8m, 폭 0.5~1.2m의 철근콘크리트벽을 연속해서 만드는 공법이다. 이 공법은 지수성이 좋고 안전성이 뛰어나며 대부분의 지층에서 적용이 가능하며 시공 중 진동과 소음이 적어 시가지에서의 깊은 굴착이나 대규모 공사에 많이 사용하고 있다(정교철 역, 1998). 시공 깊이는 40~50m 정도이나 100m 정도까지도 시공이 가능한 반면 시공비가 비싼 단점이 있다. 지중

연속벽공법 중 CIP(Cast In concrete Pile) 공법은 어스 드릴(Earth Drill)을 이용하여 지반을 찬공하고 시멘트 몰탈 주입과 보강용 H형강이나 철근망을 삽입하여 강성이 큰 토류벽 구조물을 만드는 것이다. 이 공법은 강성이 커 굴착으로 인하여 주변지반에 미치는 영향이 거의 없으며 특수한 장비도 필요하지 않다. 그러나 기둥간의 연결성이 좋지 않아 벽체의 차수기능이 떨어지고 토사유실의 가능성도 있다. 적용지반은 어스 드릴의 찬공이 가능한 모든 지반에 설치할 수 있으며, 특히 건조한 점성토지반에 적당하나 호박돌층, 비점성지반, 함수성 지반의 경우에는 사용이 제한된다. 시공방법에는 개착구간에 H형강이나 철근망을 집어 넣고서 현장 타설 몰탈을 주입하는 방법과 현장 타설 몰탈을 먼저 주입하고서 H형강이나 철근망을 삽입하는 방법이 있다. 슬러리월(slurry wall)공법은 굴착면의 붕괴와 지하수침투를 방지하기 위해 일정 폭으로 굴착하고 이 곳에 안정액(slurry liquid)을 채우면서 원하는 깊이까지 굴착한 후, 연속적으로 벽체를 설치하는 공법이다. 이 공법으로 시공한 곳은 속초시 쌍천지하댐으로 시멘트와 벤토나이트를 재료로 한 CBSW(Cement Bentonite Slurry Wall) 공법을 사용하였다.

주입공법 ; 주입공법은 지반을 소구경으로 찬공하고 시멘트 현탁액(grout milk), 약액 등의 지수재료를 주입하여 지반의 공극을 메우는 공법이다. 이 공법은 시공이 간편하고 심도에 제한을 받지 않으며 기반암과의 밀착이 가능하고 원지반을 교란하지 않으므로 광범위하게 이용되고 있으나 투수성이 불균질한 이방성지반에서는 주입재가 주로 투수성이 큰 부분을 따라 주입되므로 개량 범위가 불균질한 결점이 있다. 이 때문에 최근 일본의 대규모 지하수댐 시공에서는 원위치교반혼합공법의 보조적 수법으로 많이 이용되고 있다.

주입공법에는 시멘트그라우팅, SP 공법(Superfine Permeation Method), MSG(Micro Silica Grouting) 공법 등이 있으며, 약액을 사용하는 SGR(Space Grouting Rocket system), JCM(Just selected Chemical Grouting Method), 우레탄주입공법 등이 이용되고 있다.

일반적으로 많이 사용되는 시멘트그라우팅에 사

용되는 물과 시멘트비(W/C)는 일반적으로 10~1의 범위이고 시멘트 농도가 낮은 배합에서 순차적으로 높은 부배합으로 주입한다. 주입량이 많은 경우에는 주입효과를 높이기 위해 모래 플라이에쉬, 벤토나이트, 점토 등을 첨가하기도 한다. 일반적으로 주입공법에 의해 확보되는 투수계수 $K=\alpha \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ ($\alpha = 1.0 \sim 9.9$) 정도이다.

시멘트그라우팅의 주입재의 침투성을 높이기 위하여 사용하는 공법으로 SP 공법이 있는데 이는 고성능·연속·습식·초미립분산기(high performance continuous wet superfine dispersion machine) 즉, Ground Flex를 사용하여 주입현장에서 보통 포틀랜드시멘트를 평균 3 μm 의 입경을 가진 초미립자시멘트로 가공 생산하여 주입재료로 사용하는 공법이다. 또한 Ground Flex로 가공 생산할 경우 재료 비용을 크게 줄일 수 있으나 현재까지는 국내에서 이 장비가 보편화되어 있지 못하므로 저렴한 장비의 국산화가 시급하다.

MSG 공법은 평균입경이 3~7 μm 인 마이크로 복합실리카를 주입재료 사용하므로 고침투성, 고강도성, 고내구성 및 환경친화성을 특징으로 한다. 이 공법의 특징은 실리카질 함량과 겔타입 조절제를 이용해서 겔타입을 3~5초의 초급결, 9~12초의 급결, 60~90초의 완결 및 5~7분의 지결성에 이르기까지 폭넓게 조절할 수 있으며, 주입장치로 1.5shot 방식(더블팩커형 슬리브주입방식) 또는 2.0shot 방식(이중관형로트주입방식)의 특수선단장치를 선택적으로 사용할 수 있기 때문에 복잡한 출수(出水)상황과 호층(互層)지반에서도 지반개량 목적에 따라 효과적으로 그라우팅이 가능한 공법이다. 이와 같이 MSG 공법은 순결에서 비교적 긴 완결까지 복합주입이 가능한 주입재료와 선단장치를 선택적으로 사용할 수 있기 때문에 주입의 효율을 크게 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

SGR 공법은 물유리계 주입재를 사용하는 이중관복합주입공법의 일종으로서 대상범위를 보다 확실하게 개량하기 위하여 특수한 선단장치(rocket)와 3조식 교반장치를 갖추고 있으며, 대상지반 중에 형성시킨 유도공간을 통해 급결결과 완결성의 주입재를 저압에 의해 연속으로 복합주입하는 방식이다. 이 공법은 시공 효과가 확실한 장점이 있

으나 내구성이 크지 못하므로 물막이벽 시공시 1차 차수를 목적으로 시공하는 것이 좋으며, 전 공정을 SGR 공법으로 시공하는 경우에는 투수성에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다. 이 공법으로 시공한 곳은 경북의 이안지하댐으로 물막이벽의 내구성과 차수효과의 지속성 여부를 프론티어연구개발사업으로 조사 중에 있다.

JCM 공법은 저압등압식 펌프를 이용한 부드럽고 완만한 이중관롯드저압주입방식으로서 SGR 공법을 바탕으로 국내에서 보완 개발한 방식이다. 이 공법은 약액 믹서와 주입펌프를 조합시켜 파커주입과 침투·충진주입을 토질여건에 따라 적합하게 적용한다.

우레탄주입공법은 주입재로 우레탄계 약액을 사용하는 방식으로 우레탄수지가 물속에서 결합되면 수화반응과 동시에 발포반응이 생겨 고결부피가 증가되는 경향이 있으므로 지반에 주입될 경우 현저하게 강도가 증가한다.

교반혼합처리공법 ; 교반혼합처리공법은 원위치의 지반에 시멘트 밀크 등을 고압 주입하여 지반을 혼합·교반하므로써 차수벽을 형성시키는 공법이다. 이 공법에는 많은 종류가 있으나 크게 심층혼합처리공법과 원위치교반혼합공법으로 대별할 수 있다. 본 공법은 소구경 노즐에 초고압을 작용시킨 물이나 주입액을 초고속분사하므로써 극히 짧은 시간 내에 지반을 절삭하며, 그 절삭부분의 토사와 치환 또는 토사와 혼합하는 형식으로 주입액을 보내서 경화시키는 고압분사주입공법을 이용하여 의도하는 방향이나 범위내에 벽체를 형성할 수가 있다. 통상적인 주입공법은 되도록 지반의 골격을 변형시키지 않고 공극 사이에 주입재를 채워 넣는 원리이지만, 고압분사주입공법은 적극적으로 지반의 골격을 파괴해서 치환 또는 혼합교반하는 것으로서 시공원리가 전혀 다르므로 일반적으로 그라우팅공법의 범주에 포함시키지 않고 있다.

심층혼합처리공법은 시멘트·석회계를 주로 한 안정제를 원위치 지반에 투입, 혼합하여 연약점성토 지반을 주상, 피상 또는 전면적으로 개량하는 공법으로 시공 깊이는 약 35m 정도로 깊은 편이다. 본 공법의 특징은 개량효과가 크고 조기에 높

은 개량강도를 얻을 수 있으며 침하량이나 측방으로의 이동량이 적고 지진동 저소음으로 시공할 수 있는 장점이 있는 반면에 지반의 종류에 따라 개량 정도의 차이가 크고 공사비가 비싼 단점이 있다(천병식, 1998). 이 공법에는 교반기를 이용하여 지반을 기계적으로 굴착하고 시멘트슬러리 등의 고화제와 교반 혼합하는 기계적혼합처리방식, 고화제를 고압의 공기와 함께 지반 중에 분사하여 지반을 절삭·혼합하는 분사혼합처리방식 및 이 둘을 혼합한 기계분사혼합처리방식이 있다.

대표적인 기계적혼합처리방식인 CDM(Cement Deep Mixing) 공법은 화학적으로 고결시키는 방법으로 시멘트슬러리를 연약지반에 혼합시켜 지반내에 더 강한 벽체를 생성시키는 공법이다. CGS(Compaction Grouting System) 공법은 대상지반의 토성과는 무관하게 균질한 개량체를 형성할 수 있는 비배출치환방식의 주입공법으로서 슬럼프치가 1" 이하의 비유동성 몰탈을 지중에 압입하여 토중에 방사형의 압력을 가하므로써 주변지반의 공극을 감소시켜 지반이 조밀화되도록 개량하는 공법이다. 그 외에도 SWING(Spreadable WING, 획폭식 지반개량공법), DCM(Deep Cement Mixing Method) 등의 공법이 있다.

분사혼합처리방식은 약액주입공법을 배경으로 발전한 공법으로 혼합방식도 많지만 기본적으로는 고압의 분사에너지로 특수노즐에서 안정제를 분사하고 주변지반을 굴착교란해서 안정제와 원위치 흙을 혼합시키는 방식이다. 이 방식에는 주로 시멘트분말 또는 석회를 사용하는 DJM(Dry Jet Mixing) 공법과 시멘트를 사용하는 CCP(Cheical Churning Piling Method) 공법, 이중관주입고압분사교반공법인 JSP(Jumbo Special Pile Pattern) 공법 등이 있다. JSP 공법은 초고압의 제트류를 이용하여 연약지반을 개량하는 공법으로서 경화제(시멘트 페이스트)를 수중에 현탁시킨 상태의 슬러리를 에어제트와 함께 지반 중에 고압분사하여 지반을 파괴하고 지반과 경화제의 혼합교반을 동시에 시행하므로써 원주상의 벽체를 형성시키는 공법이다. 본 공법의 특징은 어떠한 지반에서나 적용이 가능하고 수직, 경사 어느 방향으로도 시공되며 시공이 간편하고 개량 후의 지반강도 및 투수성감소 효과가 특출한 장점이

있다(안용순과 이태식, 1997). 본 공법으로 시공된 곳은 경북 남송지하댐이 있다.

원위치혼합교반공법(Soil Cement Mixing Wall, SCW)은 지반을 계획 심도까지 천공한 후 시멘트 슬러리를 주입하고 굴착토와 교반·혼합하여 지중에 소일 시멘트(soil cement) 벽체를 연속적으로 조성하는 공법이다. 본 공법은 시멘트와 토사를 혼합하여 도로의 지반개량공으로 시공한 것이 시초가 되어서 소일 시멘트공법을 거쳐서 SCW 공법으로 개발되었다. 현위치교반혼합공법(Soil Mixing Wall, SMW)은 지중에 주상의 벽체를 연속적으로 설치하는 공법으로 최근 일본에서 지하수댐 축조방법의 주류가 되고 있는 공법이다. 시공방법은 일반적으로 3축의 오거로 지반을 굴착하고 계획 심도까지 굴착완료 후 오거선단으로부터 시멘트슬러리(시멘트, 벤토나이트, 팽창제 및 유동화제)를 주입하고 굴착토와 교반혼합하여 소일시멘트 벽체를 조성한다. 공벽이 유지되는 지반에서는 공기에 의한 굴착도 가능하지만 공벽이 유지되지 않는 경우에는 안정액(벤토나이트 등의 점토를 주성분으로 하는 것과 고분자계 분산재를 주성분으로 하는 것도 있다)을 이용하여 공벽을 유지하면서 굴착한다. 폭은 0.5m로 좁으나 시공 후 강도는 80kgf/cm², 투수계수가 $\alpha \times 10^{-6}$ cm/sec 이하로 시공효과가 좋으며 시공가능 심도가 60~70m정도나 되나 공사비가 비싼게 단점이다.

타입공법 ; 일반적으로 타입공법은 적용가능 심도와 지층의 한계가 있지만 시공이 간편하고 공사비가 적게드는 장점이 있다. 재료로는 강재, 목재 등이 있으며 타입방법으로는 진동압입, 유압압입, 오가병용압입(오거드릴 사전굴착)방법이 있고 보조공법으로 워터젯(water jet, 고압물분사 노즐을 파일에 부착하여 지반 절삭을 행하는 시공법)을 병용하기도 하지만 일반적으로는 암 굴착이 불가능하다(단, 록오거 등으로 암반을 미리 파쇄하면 가능하다). 일본 키카이지하댐에서 시험 적용한 본 공법은 끝을 가공한 H강을 진동압입기로 암반에 충격을 가해 파쇄하면서 압입하는 특수한 방법을 사용하였다.

물막이벽 재료

점토 ; 대수층이 비교적 얇아 개착에 의해 쉽게 지수벽을 구축할 수 있을 경우 경저성 측면에서 충분히 적용가능한 차수재료이나 다짐이 불량한 경우에는 시간이 오래 경과되면 세립자가 유거되므로 지수성이 떨어지게 된다. 일반적으로 $\alpha \times 10^{-5}$ cm/sec 정도의 투수계수를 확보할 수 있다.

모르터·콘크리트 ; 모르터, 철근콘크리트 등의 투수성은 $K=\alpha \times 10^{-8} \sim 10^{-6}$ cm/sec 정도이고 균열이 발생하지 않으면 충분히 높은 지수성을 얻을 수 있다. 지중연속벽공법 등으로 수중타설된 경우는 동결의 발생에 의해 끝 부근의 품질이 나빠질 경우가 있기 때문에 주의할 필요가 있다.

차수시트 : 고무, 아스팔트, 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 등의 인공합성재료는 투수계수가 거의 "0"이고 지수벽으로서의 필요조건을 만족하지만 시공시의 연속성 확보, 파단대책 등은 해결해야 할 과제이다. 이들 재료를 선정할 때에는 강도, 내구성 외에도 그 재료성분의 지하수 용출 및 폐기 후에 환경에 미치는 영향이 없다는 것을 확인할 필요가 있다.

시멘트 현탁액 : 주입공법에 많이 사용되는 주입 재료로서 시멘트와 물을 일정한 비율로 혼합한 것으로 이에 소량의 분산제를 첨가하기도 한다. 재료만으로 벽체를 구축하는 것이 아니고 지반의 공극에 주입하여 지반과 일체화하여 물막이벽으로서의 기능을 하게 하는 것이다.

시멘트는 강도나 경제적인 측면에서 가장 일반적이긴 하지만 평균입경이 17 μ m으로 조립토 이외에는 주입되지 않으며 경화하기까지 많은 시간이 요구되므로 긴급을 요하는 지수처리 때는 주입효과가 급격히 떨어지고, 더욱이 입자가 커 지반의 간극이 협소할 경우 주입 효과를 기대하기가 어렵다(장의웅 외, 2001). 마이크로시멘트를 주입재로 사용할 경우 보통포틀랜드시멘트보다 재료비용이 약 6배 정도 더 비싸지만 평균입경이 4.2 μ m으로 주입성능이 높아지므로 침투능력이 매우 높아지는 장점이 있다. 충남의 옥성지하댐은 마이크로시멘트를 사용하여 시공하였다.

초미립자시멘트는 그 입도가 보통포틀랜드시멘트에 비해 초미립일 뿐만 아니라 일정한 입경내로 정립(整粒)되어 있고 입자의 모양도 장축 또는 편상이 아닌 구형 또는 입방형으로 되어 있기 때문에 보통포틀랜드시멘트의 알갱이가 들어가지 못하는 암반의 미세한 틈새(hair cracks)까지 침투가 가능하다.

약액 ; 약액은 현탁액형의 비약액계와 약액계로 나눌 수 있으며 비약액계에는 시멘트, 점토, 아스팔트 등이 이에 해당한다. 일반적으로 말하는 약액은 약액계를 지칭하며 이는 다시 물유리계와 고분자계로 구분할 수 있다. 일반적으로 약액은 현탁액형, 물유리계, 고분자계 순으로 침투성이 좋아지고 가격은 비싸게 되므로 지반조건과 시공목적에 따라 다각적으로 검토한 후 선택해야 한다(천병식, 1998).

고분자계에 속하는 우레탄계 약액에는 수용성(1액형)과 비수용성(2액형) 등 두가지 형이 있으며 수용성은 친수성으로서 물에 용해되는 성질이 있고 다른 첨가제를 조합하므로써 사전에 겔화시간을 설정할 수가 있다. 비수용성은 배합시에 물을 포함하지 않는 주제 및 첨가제로 되어 있어서 지중의 물과 반응하기 때문에 지하수의 변화에 따라 겔화시간이 변동되는 성질이 있다. 또한 비수용성은 발포 성능이 있는 약액으로서 개량이 필요한 지반의 한정된 범위에 압입볼트를 사용하여 1.5shot방식으로 주입 시공하여 지반의 강도증대 및 차수효과를 증대시키게 된다.

물유리(water glass)계 약액은 차수효과가 커 많이 쓰이고 있으나 고결강도, 내구성 면에서 만족스럽지 못한 단점이 있는데 그 이유는 지하수에 의한 약액의 용탈과 이장현상(syneresis) 때문인 것으로 알려져 있다. 그러므로 약액주입시에는 대상 지반조건에 맞는 시공방법과 재료를 선택하고 적절한 시공을 하여야 강도 및 내구성 저하 문제를 해결할 수 있다.

소일 시멘트·자경성안정액 ; 소일 시멘트라 함은 시멘트슬러리 또는 자경성안정액(自硬性安定液)과 굴착 흙을 교반혼합고화한 것이다. 자경성고화액은 물과 시멘트 이외의 고화시간 조절을 위한 팽

창재 및 내구성확보와 공벽의 누수방지를 위하여 벤토나이트 등을 첨가한 것이고 굴착 흙과 혼합하지 않고 단일체로 지수벽체료로 사용하는 것도 가능하다. 소일 시멘트 및 고화한 자경성안정액의 투수성은 $K=\alpha \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 정도이다.

강재 ; 일반적으로 사용되는 강재는 U형, H형, Z형, 직선형, 강관형 등이 있다. 강재의 이음부에는 서로 연속하여 맞물리도록 되어 있으며 재료자체는 불투수성이지만 이음부의 맞물림이 빠지지 않도록 시공하여야 하며 높은 지수성이 요구되는 경우에는 이음부의 확실한 지수를 위하여 그라우트 주입 등이 필요하다. 해안부의 염수침입방지형 지하수댐에서 조석간만에 의해 바다측의 수위가 변동하는 범위에 대해서는 부식에 대한 대책 검토도 필요하다.

강재는 재료가 싸고 풍부하므로 조달이 쉬운 반면 휨강성이 적고 부식의 가능성이 있는 단점이 있다.

기타 ; 돌더미, 목재 등의 재료도 원칙적으로는 적용 가능하다. 다만 이들 재료의 경우에는 그 시공방법과 재료특성에 의해 소규모의 적용범위에 한정된다.

지하수댐의 장단점과 입지조건

지하수댐의 장단점

지하수댐은 일반적인 지상댐 방식과 비교하여 볼 때 많은 장점을 갖고 있다. 가장 대표적인 장점은 지하수댐의 경우 수몰 면적이 없다는 것으로 물막이벽 시공 후 지표는 원상태로 복구가 되므로 가장 환경친화적인 댐이 된다는 점이다. 이 밖에도 증발에 의한 손실이 적은 점, 지하수댐(물막이벽)의 붕괴가 없다는 점, 상대적으로 공사비가 적게들며 연중 일정한 수온의 물을 얻을 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 취수를 위해 별도의 양수 시설이 필요하다는 점과 지하수 저장량에 대한 직접적인 평가가 어렵다는 점, 일시에 다량의 용수 사용이 불가하다는 점, 지하수가 오염되었을 경우 정화가 쉽지 않다는 점 등 이외에도

물막이벽의 균열 또는 누수에 대한 확인이 쉽지 않다는 단점이 있다.

지하수댐의 입지조건

- 1) 물막이벽의 길이가 짧고 깊이가 얕아야 공사비가 적게 소요된다.
- 2) 유역면적이 넓고 지형경사가 완만하고 유역상류부의 입상상태가 양호하여야 지하수의 함양이 많아진다.
- 3) 지하수를 저류하는 대수층이 깊게 발달하여 있고 유효공극율과 분급도가 좋고 투수성이 양호한 지역이어야 저장과 산출이 용이하다.
- 4) 지하수가 안정적으로 공급될 수 있도록 연간 강우량이 많고 지속적인 곳이어야 한다.
- 5) 현재의 지하수위가 낮은 곳이라야 물막이벽 시공 후 수위상승효과가 커 유리하다.
- 6) 대수층에 점토층이 혼재되어 있지 않거나 두께가 얇은 곳이어야 저류 및 취수가 유리하며, 지반의 침하도 방지할 수 있다.
- 7) 해안부에서 담지하수층으로의 염수침입이 없었거나 있었더라도 그 규모가 작은 곳이라야 댐 건설 후 저류역 내에 남아 있는 염수의 제거가 쉽다.
- 8) 물막이벽 상하류부에서 현재 지하수 이용이 적은 곳이어야 유리하다. 지하수 이용이 많은 곳이면 관정 소유자와 분쟁 가능성이 크며, 물막이벽의 하류에서는 주로 지하수위의 저하에 의해, 해안면에서는 주로 염수침입으로 인하여 지하수 사용이 어려워지기 때문이다.
- 9) 지하수위 상승에 의해 기존 지하구조물에 침수 등의 영향이 일어나지 않는 지역이어야 한다.
- 10) 물막이벽 상류부에 대규모 오염원이 없거나 향후에도 오염배출시설이 설치되지 않는 곳이어야 지하수의 수질을 보전할 수 있다.

국내 · 외 지하수댐 개발 · 이용현황

우리나라의 지하수댐 개발 · 이용현황

지하수댐은 정부의 농업용수 10개년개발계획에 포함된 지하수개발계획을 효과적으로 추진하기 위하여 농업용수원으로서의 지하수댐 설치 가능

성을 검토하기 위한 시험연구사업의 일환으로 계획된 것으로서(농업진흥공사, 1982), 1981년도에 한해가 들자 경상북도 상주시 이안면 양범리 일대에 농업용수 공급을 목적으로 하는 최초의 지하수댐인 이안지하댐을 건설하였다(농업진흥공사, 1984). 이안지구는 당시 농업용수를 공급할 수 있는 다른 수원공이 없었으며, 지하수댐의 입지조건 중 다량의 지하수를 저장할 수 있는 분지형 지형이고 하천경사가 비교적 완만하며(하상경사 12/1,000), 하류 유출부가 협곡으로 되어 있어 물막이벽 시공비가 적게 드는 등의 장점이 있어 최초의 시험사업지구로 선정되어 1981.11.18일부터 1982.11.29일까지 1년간에 걸친 조사 후 1983.4.17일 공사에 착수하여 같은 해 12월31일 준공되었다. 그러나 유역면적이 2,130ha(유역 내 안룡저수지 유역을 제외하면 1,805ha)로 협소하며, 총적층의 평균두께가 4.5~7m 밖에 되지 않는 지역인데다 물막이벽을 하부의 풍화대 및 기반암까지 밀착시키지 않고 총적층까지만 설치하여 하부로의 지하수 유출이 가능하게 설치되어 있어 저류효과가 양호하지 못한 것으로 추정된다. 이안지구에 대해서는 준공 후에도 사후평가(농업진흥공사, 1985) 및 연구(농어촌진흥공사, 1996b)를 실시하였고, 물막이벽 설치 전·후의 투수성에 대한 비교 분석(김희성, 1996)도 행해진 바 있다.

이안지하댐 준공 후에도 충남 옥성지구, 경북 남송지구, 전북 고천지구, 전북 우일지구 등에 농업용수용 지하수댐을 시공하고 취수정으로서 방사상집수정을 설치하여 농업용수로 사용하고 있다 (Table 2).

생활 용수의 취수를 위해 지하수댐이 활용된 국내의 대표적인 사례는, 해수침입방지와 지하수 함양으로 다량의 지하수를 저류시킨 후 상수도로 사용하기 위하여 강원도 속초시 쌍천(유역면적 6,533ha, 하상경사 1/25~1/88)의 해안에서 약 300m 지점에 강원도 쌍천시에서 설치한 쌍천지하댐이 대표적인 예이다. 쌍천지하댐에서 취수하는 상수도 양은 연간 15백만m³(2000년)으로 속초시 급수량의 68%를 담당하고 있는 매우 중요한 상수원으로 2011년 계획인구 135,000명에 대한 일일 급수예상량 43,000m³의 수원을 확보하고자 추가 시설을 계획 중이다. 그러나 물막이벽 시공구간의

지하수댐 몰막이벽 시공법과 해안지역 염수침입 방지기술 개선 방안

기반암이 선캠브리아기 경기편마암 콤플렉스에 속하는 호상편마암으로 경연질암 풍화에 따른 요철이 심하여 일부 구간에서 몰막이벽과 하부 기반암이 밀착되어 있지 못하며, 몰막이벽의 투수계수가 $\alpha \times 10^{-4}$ cm/sec 정도로 추정되므로 갈수시

염수침입 문제가 제기되고 있으며(박창근, 2000) 일부 취수정은 갈수시 사용이 어려운 편이다. 본댐은 1998년에 1단계 몰막이벽을 완공하고 2000년도에 잔여구간인 양양군쪽 40m를 추가로 설치하여 총 840m의 몰막이벽이 시공되었다.

Table 2. Selected sites of Groundwater Dam in Korea

Item	Ssangcheon	I-an	Namsong	Okseong	Gocheon	U-il
Location	Kangwon Sokcho	Kyongbuk Sangju	Kyongbuk Pohang	Chungnam Gongju	Chonbuk Chongup	Chonbuk Chongup
Storage type	Subsurface	Subsurface	Subsurface	Subsurface	Subsurface	Subsurface
Water usage	Drinking	Agricultural	Agricultural	Agricultural	Agricultural	Agricultural
Purpose	Combination	Increase storage	Combination	Increase storage	Increase storage	Increase storage
Wall type	Overflow	Retention	Overflow	Overflow	Overflow	Overflow
Technique for constructing wall	Replacement (CBSW +Concrete)	Injection & Replacement (SGR+Concrete)	Injection (JSP)	Injection (Microcement)	Replacement (Ferroconcrete)	Replacement (Clay)
Wall length(m)	840(800+40)	230(194+36)	89	482	192	778
Wall height(m)		5	18.8	9.16	75	6.7
Well type (number)	R.C.W. (4)	R.C.W. (4)	R.C.W. (4)	R.C.W. (4)	R.C.W. (5)	R.C.W. (4)
W.A.(ha)	6,533	2,130	15,300	27,500	2,700	2,200
Ave. alluvial layer thick(m)	16	4.5~7	10~15	10 ±	6~7	6.5
Coefficient of transmissibility (m ² /D)		268~403	300	113~183		133
T.S.C.(m ³)		4,143,000	4,017,000	2,850,000	1,534,000	2,457,000
T.S.C./W.A. (m ³ /ha)		1,945	262	103	568	1,116
Abstraction rate (m ³ /D)	27,000	24,000	27,000	27,900	25,110	16,200
Geology	Banded gneiss (Precambrian)	Granitic gneiss (Age unknown)	Uncemented Sedimentary rocks (Tertiary)	Banded gneiss	Schistose granite (Mesozoic)	Gneissose granite (Mesozoic)
Completion	2000	1983	1986	1986	1986	1986

* W.A. ; Watershed Area, Ave. ; Average, R.C.W. ; Radial collector well, T.S.C. ; Total storage capacity

다른나라의 지하수댐 개발·이용현황

외국에서는 물을 지하에 저장하는 방법이 로마 시대부터 시행되어 왔는데 중동지역에서는 지하 동굴을 건설하여 물을 저장하였으며 아프리카지역에서는 인공적인 모래저장댐을 축조하여 사용하였다. 인도에서는 Kerala주 Palghat Gap 지역에 1964년과 1979년에 각각 1개씩 2개소, 에디오피아에서는 1981년에 Bombas와 Gursum 지역에 각각 지하수댐을 건설하였다.

중국은 우리나라와 비슷한 1980년대부터 지하수댐 개발이 시작되었는데, 협서성 서안시 북방 약 10 km 위치에 동서로 흐르는 위하(渭河)의 지천인 석천(石川)의 하류부에 대수층의 저수용량이 5억 m³이나 되는 부평(富平)지하댐을 건설하고 있다(赤井浩一, 1983). 현재는 요녕성(遼寧省) 대련시(大連市)에 삼간보(三澗堡)지하댐을 정밀 조사 중이며(金森信夫 외, 2000), 용하(龍河)지하댐을 1999년에 착공하여 시공 중에 있다(녹자원공단, 2000). 삼간보 지역은 지하수의 과잉양수로 인하

여 해안으로부터 약 5km 정도까지 염수가 침입하여 있는 곳으로 해수의 침입을 방지하고 농·공용수를 확보하기 위하여 지하댐(총저수량 6,142천 m³, 1일 취수가능량 12,300m³) 설치를 계획하였으며 물막이벽은 해안에서 약 200m 떨어진 곳에 설치할 예정이다. 이 댐의 특징은 지하에 물막이벽(L=1,200m, H=2.5~23m)을 설치하고 지상에는 염수침입방어벽(L=400m, H=2m)을 설치하여 지하수와 지표수를 동시에 저류시키도록 하였으며, 상류부에 홍수조절점 지표수함양을 위한 홍수방어벽 3개소(L=75m, H=1.2m)를 계획하였고, 취수정(φ10m)과 물막이벽 사이에는 염수배수정 4개 공(φ5m, D=10~15m)을 별도로 설치하고 또한 저류유역내에 오수 배제를 위한 배수관로 15km와 관측정 15공도 계획되어 있다(Fig. 1). 용하지하댐은 물막이벽의 길이가 620m, 최대높이 12m, 총저수량 640천m³의 염수침입방지형 지하수댐으로 물막이벽은 고압분사주입공법으로 시공 중에 있다.

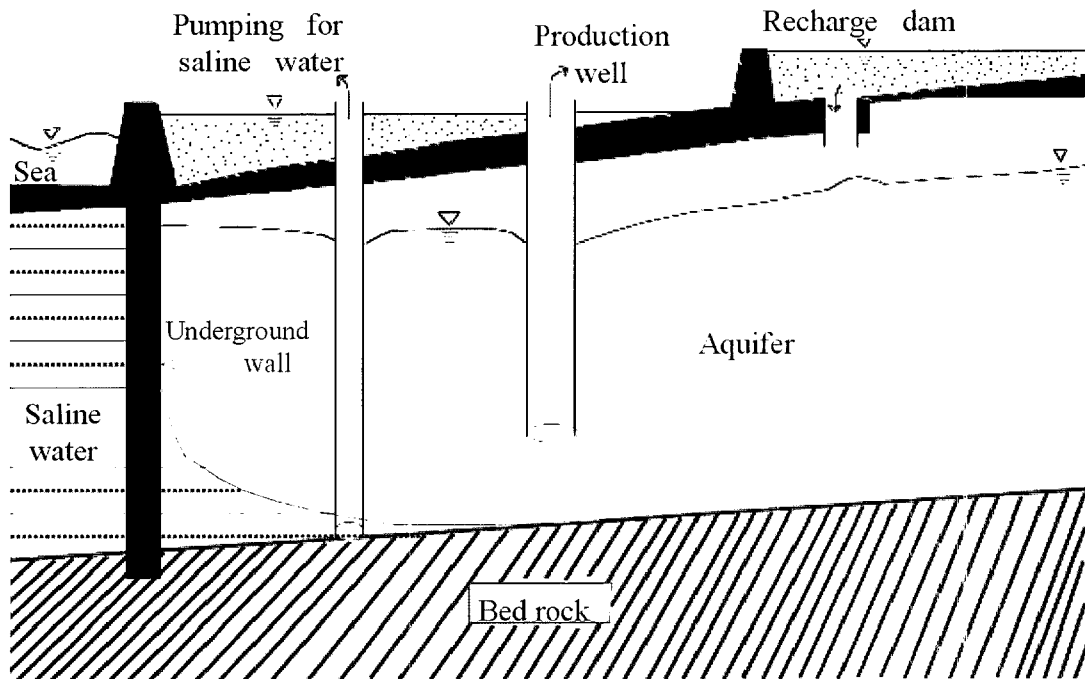


Fig. 1. Schematic cross section of Samganbo groundwater dam

지하수댐 물막이벽 시공법과 해안지역 염수침입 방지기술 개선 방안

일본에서의 본격적인 지하수댐 개발은 농립수 산성을 중심으로 실시되었다. 1974년도에 오키나와현 미야코지마(宮古島, Miyakojima)를 대상으로 지하수댐에 의한 농업용수 개발의 기초조사가 시작되었다. 미야코지마는 그 대부분이 표고 100m 이하의 거의 평활한 제4기 류큐(琉球, Ryukyu)석회암대지로 구성되어 있으므로 연간 강우량이 2,000mm를 넘지만 발달된 투수성 지층 때문에 지표수는 거의 보이지 않는 지역이다. 그러므로 관정이 유일한 수원인데, 지하수의 대부분은 지하계곡으로 흐르고, 해안 부근에서 용천수로써 용출되고 있다. 1977년부터 1978년도에 조사비 9억엔을 투자하여 실험용 지하수댐으로서 미나후크(皆福, Minahuku)지하수댐을 축조하였다. 그 이후에 농업용수원 확보의 수단으로써 류큐제도 전체를 대상으로 한 지하수댐 적지선정조사가 본격화되었는데 1980년도에는 지하수댐을 수원으로 하는 미야코지마 국영토지개발사업계획조사가 실시되었고

1987년도에는 미야코지마 토지개발사업의 수원으로서 수나가와(砂川, Sunagawa), 후꾸자또(福里, Hukuzato)지하수댐 개발이 착수되었으며, 그 후 1989년도에 농용지정비공단(현 녹자원공단)에 승계되어 1998년도에 완공되었다(吉田健治, 2000).

그 후, 오키나와에서는 1992년도에 남부지구에 코메스(米須, Komesu), 기자(慶座, Giza)지하수댐이, 1995년도부터는 현(縣)직영사업으로서 쿠메지마(久米島)에서 칸진(Kanjin)지하수댐이 착수되었다. 또, 오키나와 이외에서는 큐우슈(九州)농정국에 의해 키카이(喜界, Kikai)지하수댐이 1993년도부터 착수되었다. 1992년에는 쥬우고꾸시꼬꾸(中國四國)농정국에 의해 에히메현(愛媛縣)의 나카지마(中島, Nakajima)지하수댐이 실험용지하수댐으로서 완공되었는데, 이 때부터 류큐석회암 이외의 사력층 지반을 대상으로 한 시험이 본격적으로 시작된 것으로 알려져 있다.

Table 3. Groundwater Dam in Japan including under construction

Item	Minahuku	Sunagawa	Hukuzato	Kanjin	Giza	Giza	Yokatsu
Location	Okinawa, Gusukube	Okinawa, Gusukube	Okinawa, Gusukube	Okinawa, Gushikawa	Okinawa, Gushikawa	Okinawa, Itomang	Okinawa, Katsuren
Storage type	Subsurface	Subsurface	Subsurface	Surface/ Subsurface convertable	Subsurface	Subsurface	Subsurface
Water usage	Agricultural	Agricultural	Agricultural		Agricultural	Agricultural	Agricultural
Purpose	I.S.	I.S.	I.S.	I.S.	I.S.	P.S.I.	I.S.
Wall type	Overflow	Overflow	Overflow	Overflow	Overflow	Overflow	Overflow
Technique for constructing wall	Injection	SMW	SMW	SMW	SMW	SMW	SMW
Wall length(m)	500	88	1790	1,080	969	2,489	705
Wall height(m)	16.5	24.8	27	41	53	68.4	67.6
W.A.(ha)	120	720	12,400	300	120	390	28.6
T.S.C.(m ³)	700,000	9,500,000	10,500,000	1,431,000	369,000	3,457,000	3,963,000,
T.S.C./W.A. (m ³ /ha)	5,833	13,194	846	4,770	3,075	8,864	13,856
Abstraction rate (m ³ /D)	7,000	24,110	30,140	21,200		8920	14,368
Geology	Mudstone (Tertiary)	Mudstone (Tertiary)	Mudstone (Tertiary)	Agglomerate (Tertiary)	Mudstone (Tertiary)	Mudstone (Tertiary)	Mudstone (Tertiary)
Completion (Wall)	1978	1994	1998	1998	2001(1992)	2002(1997)	2006

(continue)

Item	Kikai	Nakajima	Kabajima	Waita	Tengakuma	Jyoshin	Meko
Location	Kagoshima, Kikai	Ehime, Nakajima	Nagasaki, Nomugiki	Nagasaki, Toyotama	Hukuoka, Umima	Hukuoka, Mikata	Hukuoka, Mikata
Storage type	Subsurface	Subsurface	Subsurface	Subsurface	Subsurface	Subsurface	Subsurface
Water usage	Agricultural	Agricultural	Drinking	Drinking, Agricultural	Drinking	Drinking, Fishery	Drinking, Fishery
Purpose	I.S.	P.S.I.	P.S.I.	P.S.I.	I.S.	P.S.I.	P.S.I.
Wall type	Overflow	Overflow	Overflow	Overflow	Overflow	Overflow	Overflow
Technique for constructing wall	SMW	SMW	Injection	Slurry wall	Injection	Slurry wall	SMW
Wall length(m)	2,280	88	74	105	129	202	196.2
Wall height(m)	36	24.8	27	7.5	12.5	18.5	39.3
W.A.(ha)	580	60	60	340		45	5.7
T.S.C.(m ³)	1,800,000	27,000	9,000	34,000	18,000	74,000	23,000
T.S.C./W.A.(m ³ /ha)	3,103	450	150	100		1,644	4,035
Abstraction rate (m ³ /D)		500	300	280	800~1,000	300~420	464
Geology	Mudstone (Tertiary)	Andesite (Tertiary)	Schist	Shale (Cretaceous)	Granite (Cretaceous)	Clay slate (Paleozoic)	
Completion	2000	1993	1980	1991	1987	1982	1995

* I.S. ; Increase Storage, P.S.I ; Prevent Seawater Intrusion, SMW ; Soil Mixing Wall

현재 일본에서 시공 중인 지하수댐은 오키나와 중부 요카쯔반도에 위치한 요카쯔(与勝, Yokatsu) 지하댐이 유일하다. 본 댐은 1992~1997년까지 현에서 1차 조사를 하였고 1997~1999년까지 국가 지원으로 정식 조사를 하였으며 1999년에 착공하여 2006년에 완공할 계획으로 물막이벽(L=705m, H=67.6m)은 SMW공법으로 시공 중에 있다. 총저수량은 3,963천m³, 유효저수량은 1,382천m³으로 1일 최대 14,368m³을 취수하여 농업용수로 사용할 예정이다(오키나와현, 1999).

우리나라 지하수댐 이용상의 문제점

지하수댐은 이론적으로 대용량의 지하수를 효과적으로 확보할 수 있는 시설로서 국내에서는 1980년대 초부터 농업용수 확보 차원에서 추진

및 설치하였다가, 최근에 와서 물 부족 현상을 해결하기 위한 수자원 확보 기술들이 재검토되면서 환경단체 및 주민들과의 마찰을 피하면서 대용량의 취수가 가능한 방안으로 주목받기 시작한 시설물이다.

이처럼 약 20년 전부터 조사·시공되었던 지하수댐이 활성화되지 못하고 중단되었던 주요한 문제는 첫째, 물막이벽 시공기술 미흡으로 인하여 저류효과가 양호하지 못한 점, 둘째, 대수층 수리분석 조사 미흡으로 인한 계획취수량의 과다 설계, 셋째, 물수지 및 수문분석 미흡으로 인한 저류량과 이용가능량 추정 오류, 넷째, 저류역내 하상에서의 과다한 골재채취로 인한 대수층의 수위강하와 교란으로 기존 취수시설로의 유입량이 크게 감소하게 됨으로써 취수량의 급감현상 발생, 다섯

제, 지속적인 유지관리와 모니터링 결여로 문제점에 대한 해결 및 복원 기회 상실, 여섯째, 정부예산 부족으로 인한 사업 지원 중단, 일곱째, 해안지역에서 염수침입에 대한 대응기술 미흡 등을 들 수 있다. 이 외에도 대용량 취수정으로 시공하였던 방사상집수정에 대한 시공기술이 부족하여 급속히 노후화된 점도 지하수댐을 활성화시키지 못한 이유로 추정된다.

국내에 시공된 농업용 지하수댐의 경우 유역면적이 2,130ha에서 27,500ha에 이르나 저류량은 1,534천m³에서 4,143천m³로 유역면적 대비 저류량이 ha당 103~1,945m³ 밖에 되지 않는다(Table 2). 일본의 경우 유역면적 대비 저류량은 ha당 100~13,856m³으로(Table 3) 이는 저류역내 대수층의 두께가 우리나라보다 3배 이상이 되기 때문이며 이로 인하여 이용가능수량이 많아 지하수댐의 효율이 대단히 높다.

이안지하댐의 경우 수평착정공의 선단부가 평균 6° 정도 상향 시공됨으로 인하여 선단부가 대수층을 벗어나거나 양수시 지하수위 상부에 노출되는 경우가 발생하므로써 채수량 부족현상이 일어난 것으로 보고되어 있다(농업진흥공사, 1985). 또한 수평착정공에 취수관으로 삽입한 PVC 스트레나는 개공율이 8%(자재 파손의 위험이 있어 개공율을 더 크게 하지 못하였음) 정도이고 시공 후 스트레나 구멍으로의 점토 유입량 증가, 토압에 의한 스트레나 파손 등으로 방사상집수정의 기능이 급속히 저하되고 있다. 그러나 현재는 수평착정시 슬라임의 자연배제와 지하수의 효율적인 집수를 위하여 실제로 상향 시공하고 있는 것으로 알려져 있다.

지하수댐 개발로 인한 주변환경에 미치는 영향

바다로 유출되는 담수차단에 의한 해양생물체의 영향

담수는 하천이나 기반암을 통하여 바다로 유출되는데 물막이벽의 설치로 인하여 그 지역에서는 담수가 바다로 유입되지 못하므로 해안 인근에 서식하는 해양생물의 생태계에 변화가 있을 수

있다.

상류부 및 물막이벽 주변에서의 지하수 수질 악화

물막이벽 상류부에 대규모 오염원이 있거나, 소규모라도 지속적으로 오염물질이 배출되는 경우 저류된 지하수가 오염되어 이를 음용수나 농업용으로 이용할 경우 위대한 경우가 발생할 수 있다.

수위상승 및 과다양수로 인한 주변영향

지하수위의 상승으로 인하여 물막이벽 설치 전에 축조하였던 지하구조물이 침수될 수 있으며, 함양량보다 많은 양의 지하수를 계속적으로 취수할 경우 지반의 침하도 예견할 수 있다.

특히 물막이벽을 협곡부에 설치할 경우 집중호우시 지하수위가 급격히 상승함으로써 배제가 순조롭지 못함에 따른 침수피해가 예상된다. 일본의 가바지마지하댐의 경우 3개 취수정에서 1977년 10월부터 1년 사이에 약 20~45cm의 지반 침하가 있었는데 이는 양수로 인한 풍화대의 압밀이 원인인 것으로 보고되어 있다(건설산업조사회, 1980).

농작물의 피해와 서식형태 변화

우리나라는 일본과 달리 총적층의 두께가 평균 10m 내외로 얇은 편인 반면 지하수위는 높게 유지되고 있다. 그러므로 물막이벽에 의한 수위상승 효과를 보기 위하여 지하수위를 과다하게 상승시키면 농작물에 나쁜 영향을 줄 수 있으며, 지표 얇은 곳까지 포화되므로 육상생물의 서식형태가 변화할 수 있다. 지하수위가 지표에서 1m 이내인 경우 그 영향이 대단히 크므로 지하수위를 무조건 높일 수 없다.

해안지역에서의 염수침입 방지기술 개선 방안

물막이벽의 누수원인

물막이벽은 지반을 스스로 지지해야할 필요가 없기 때문에 높은 강도는 불필요하나 어느 정도의 내구성과 지수성을 유지하기 위한 강도는 필요하다. 일본에서는 물막이벽체의 품질관리상 벽

체 최저강도를 10kgf/cm², 투수계수는 1.5×10⁻⁶cm/sec 정도로 설계기준 강도를 설정하여 시공하고 있으나 오끼나와현에서 물막이벽 시공에 필요한 전체적인 시공기준(안)을 2002년 초에 마련한 상태이다. 그러나, 우리나라에서는 현재까지 물막이벽에 대한 강도, 벽두께, 지수목포 등의 기준이 정해져 있지 않으며, 시공 후 투수계수가 1.5×10⁻⁵cm/sec 이내이면 가능한 것으로 시공되었다.

물막이벽의 누수는 어느 정도 지하수가 유출되는 것을 허용하는 유출억제형 지하수댐에서는 크게 문제가 되지 않는다. 그러나, 완전차수를 목적으로 하거나 염수침입방지형 지하수댐에서는 벽체가 누수되면 저류효과 및 수질 면에서 문제가 발생된다. 차수형 물막이벽이 누수되면 저류량이 감소하므로 갈수기에 용수공급이 원활해지지 못하게 되며, 염수침입방지형은 해안쪽에서 염수가 침입하게되므로 용수사용이 제한되거나 불가능하게 될 수 있다. 이처럼 지하수댐의 효능을 저하시키는 물막이벽에서의 누수 원인은 다음과 같다.

- 첫째, 물막이벽 시공부실로 인하여 당초부터 균열 등이 형성되어있어 차수효과가 떨어짐
- 둘째, 물막이벽 시공재료의 내구성이 적어 단기간에 차수재가 용탈되어 버려 투수성이 커짐
- 셋째, 물막이벽과 하부 기반암이 밀착되지 못하여 그 사이로 지하수가 유출
- 넷째, 기반암이 풍화, 균열, 파쇄가 심하여 이 곳으로 지하수가 유동하는 것 등이다.

일본 코메스(米須)지하댐에서의 염수 제거 방법

코메스지하댐은 해안에서 약 30~100m 정도 떨어져 있는데 지하수댐 시공전부터 하부 기반암인 석회암층을 통하여 지하 깊은 곳에서 내륙으로 염수가 뿔기모양으로 침투하여 있는 지역으로 물막이벽의 길이는 2,489m, 심도는 40~60m로 규모가 큰 지하수댐이다. 물막이벽은 수나가와지하댐 시공시 경제적이고 시공 효과가 좋은 것으로 알려진 SMW공법으로 변경 1997년에 벽체 시공을 완료하였으며 금년 초에 전체시설을 완공하고 농업용수로 사용 중에 있다.

시공시 댐축 부근 깊은 심도에 염수가 체류하고 있을 가능성이 매우 크므로 댐축에서 수 십m 이상의 거리를 두고 취수시설을 설치하는 것으로

계획하였으며, 염수 제거를 위하여 물막이벽 시공 순서를 조정하였는데 지하수 유동량이 가장 많은 댐축 중앙부부터 물막이벽을 설치하여 지하수의 흐름을 다른 쪽으로 바꾼 후 유수의 힘으로 제거하는 방법을 사용하였다(今成康忠 외, 1998).

물막이벽 시공 후에는 벽체에 의하여 담수와 염수가 분리되게 되는데 저류수를 이용하게되던 벽체 내·외의 수위차로 인하여 벽체와 하부 기초지반을 통한 염수침입 현상이 예상되어 이를 분석해 본 결과 갈수해(渴水年)에 총저수량 3,475천 m³의 약 3~4%에 해당하는 연간 약 12~14만m³의 염수가 침입하는 것으로 예측한 바 있다(原 郁南 외, 1996). 그러나 본 댐은 농업용수용이므로 약간의 염수오염은 별 문제가 되지 않는 것으로 현에서는 판단하고 있으며, 염수 제거효과 및 염수침입과 관련된 사항에 대해서는 관측정을 설치할 것을 검토 중에 있는 단계이다.

취수정으로서의 염수침입

해안지역 인근에 설치한 물막이벽의 상류부에 위치하는 취수정으로 염수가 침입하는 이유는 Fig. 2와 같다. 벽체 설치 후 상류부의 지하수위는 W.L.1에서 W.L.2로 높아졌지만 벽체 직 하류부의 지하수위는 설치 전보다 많이 낮아지게 된다. 이는 물막이벽 설치로 인하여 지하수의 흐름이 막혔으므로 지표수 혹은 복류수의 수위가 당초보다 많이 낮아져 해수준면에 근접하게 되기 때문이다. 또한 해안지역의 충적층에서는 담수와 염수의 밀도 차에 의해 자연적으로 유지되고 있던 담수렌즈체가 지하수위의 하강으로 인하여 점차 얇아지게 되므로 염수는 내륙쪽으로 점점 밀려오게 되고 물막이벽까지 도달하게 된다.

Fig. 3에서 물막이벽 상류부 취수정에서 지속적인 취수가 이루어질 경우 풍수기에는 하류부에 별 영향을 주지 않을 것이지만 갈수기에는 유역에서 함양되는 수량이 적어지면서 W.L.2에서 W.L.3로 지하수위의 하강이 급속히 일어나게 되고 양수에 의해 지하수위가 더욱 낮아지게 된다. 이로 인하여 벽체 하류부의 지하수위는 해수면에 근접하거나 해수면 아래로 떨어지게 되는데 이 때 벽체와 하부 기반암에서의 차수가 완벽하다면 상류부로 염수가 유입될 수 없으나 그렇지 못한 경우

지하수댐 물막이벽 시공법과 해안지역 염수침입 방지기술 개선 방안

에는 염수의 유입이 가속화 될 것이며 한번 유입 된 염수는 담수로 정수되기 쉽지가 않다.

지하로 침투되어 재사용 되는 양이 훨씬 더 많아 용수의 재이용율이 높은 등의 이유로 해안지역에

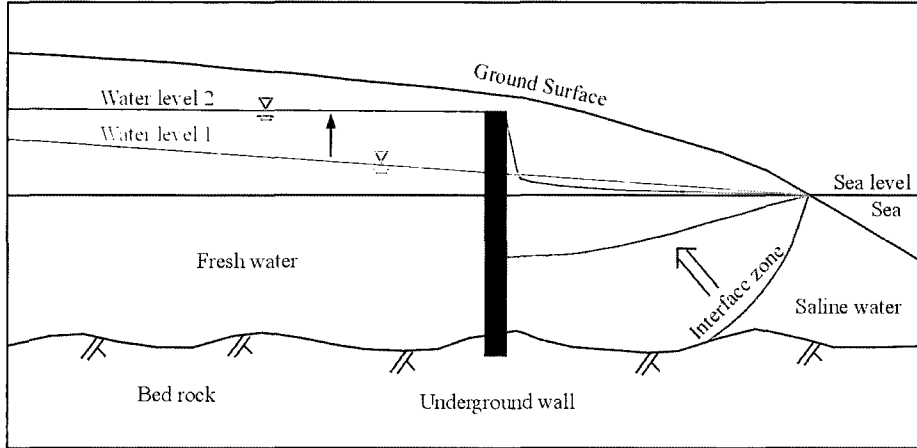


Fig. 2. Groundwater table movement after construct underground wall

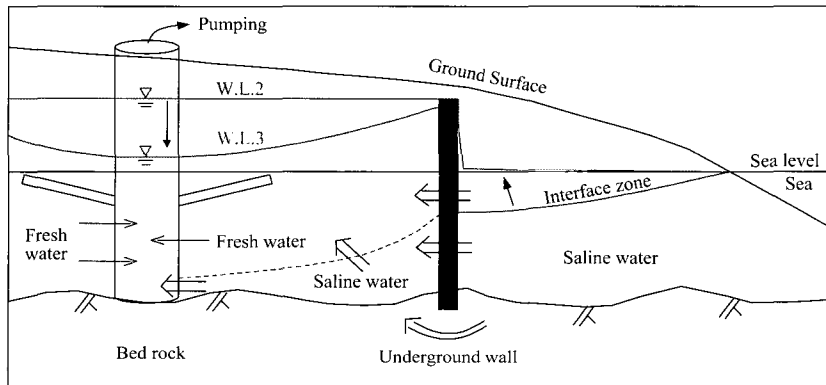


Fig. 3. Seawater intrusion with groundwater abstraction and lowered groundwater table

이중물막이벽에 의한 염수침입 방지 방안

지하수댐을 설치하여 저류 시킨 용수를 사용할 경우, 농업용수처럼 계절적·한시적으로 사용하는 경우와 상수도용으로 1년 내내 용수를 공급하는 경우에는 건설계획부터 다른 각도에서 분석해야 한다.

농업용수용 지하수댐의 경우 대부분 영농기에만 용수를 공급하며 용수는 저류역내의 경작지(대부분 논)에 급수되므로 증발되어 손실되는 양보다

서의 염수침입 현상에 대해서 아직까지 보고된 바 없다.

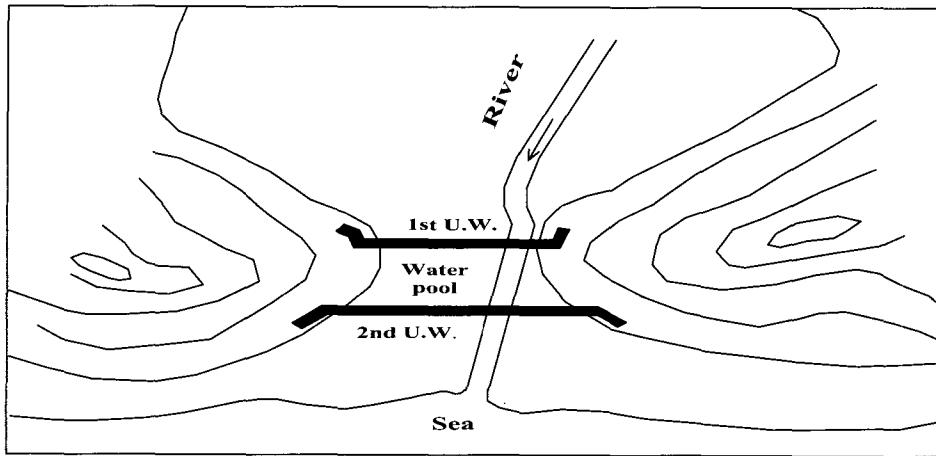
상수도용 지하수댐에서는 연중 취수하여 저류역 밖으로 용수를 공급하게되는데 이 경우에는 용수의 재이용율이 "0" 이 되므로 물 수지분석 시 장기 분석에 철저를 기하여야 한다. 만약 지속적인 용수이용으로 인하여 물막이벽이나 하부 기반암을 통하여 염수침입이 가속화된다면 다음과

같은 방법으로 이를 방지할 수 있을 것이다.

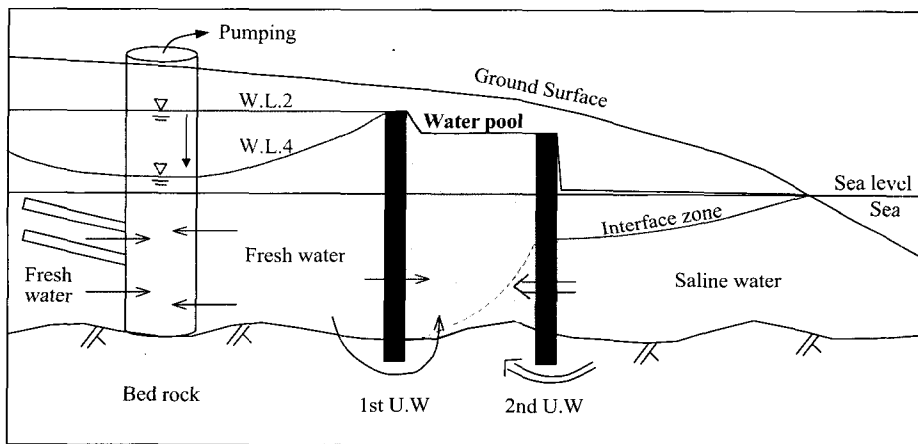
Fig. 4에서처럼 저류역 하류부에(물막이벽이 해안에 근접하여 있다면 상류부에) 2차 물막이벽을 하나 더 설치한 후 그 사이 대수층을 담지하수로 채워두면 수위가 W.L.2에서 W.L.4로 떨어지더라도 수압 및 토압에 의하여 하류부에서의 염수침입 현상을 방지할 수 있을 것이다. 이 경우 공사비의 증가와 물막이벽 사이에 갇힌 지역에서 지하수 수질악화가 예상되지만, 급수중단으로 인한

그리고 하류측 물막이벽 하단부에 여러 개의 배피해 해결이 가능하므로 시도해 볼 필요가 있다. 수공을 설치한 후 풍수기나 홍수 시 급수에 지장이 없는 범위내에서 물을 수시로 비제하여 준다면 수질악화 문제는 자연히 해소될 것이다.

지하수 채수량에 따른 염수침입량과 거리에 대한 분석, 이 경우 염수침입을 배제할 수 있는 1·2차 물막이벽의 간격과 벽 두께 등에 대한 분석은 프론티어연구개발사업의 일환인 지하담 시공·재료·비용평가 연구과제에서 시행 중에 있다.



(A)



(B)

Fig. 4. Two consecutive underground wall to prevent seawater intrusion. (A)Plan view (B)Cross section (U.W. ; Underground Wall, W.L. ; Water Level)

결 론

지하수댐은 대용량의 지하수를 효과적으로 확보할 수 있는 시설로서 국내에서는 1980년대 초부터 설치하였다가 최근에 다시 환경친화적이고 대용량의 취수가 가능한 방안으로 주목받기 시작하였다. 저류수는 유역조건과 대수층조건, 상류부 오염원 분포와 수질에 따라 상수도용, 중수도용, 농업용 또는 공업용 등으로 다양하게 이용할 수 있으며, 이용목적과 수질여건에 따라 간단하게 정수처리 하여 사용할 수 있으므로 적절한 지하수댐 설치 방법은 용수부족을 해결할 수 있는 주요 기술의 하나이다.

지하수댐이 활성화되지 못하고 중단되었던 주요한 문제는 첫째, 물막이벽 시공기술 미흡, 둘째, 대수층 수리 분석 미흡, 셋째, 물수지 및 수문분석 미흡, 넷째, 지속적인 유지관리와 모니터링 결여, 다섯째, 정부예산 부족, 여섯째, 해안지역에서 염수침입에 대한 대응기술 미흡, 일곱째, 대용량 취수정에 대한 개발·이용기술 부족 등이었다.

또한 기존의 지하수댐 시공시 개발로 인하여 주변환경에 미치는 영향—연안지역 해양식물, 저류역내 서식지 변화, 물막이벽 상·하류부의 수질 악화 등—을 간과하고 넘어감으로 인하여 일본에서도 여러 가지 문제점들이 나타나고 있다.

이러한 주요 문제점에 대한 해결방안으로는

가. 대수층 위치 및 토질에 맞는 적절한 차수공법의 선택과 정밀한 물막이벽 시공

나. 정확하고 정밀한 대수층 구조 분석, 수문 분석, 물수지 분석 등의 시행

다. 장기적인 지하수 이용계획 및 저류역내 수질보전대책 수립

라. 지속가능한 대용량 취수기술에 대한 조속한 연구

마. 수위·수질에 대한 장기 모니터링 실시로 지속적인 유지관리 시행

바. 지하수댐 개발로 인한 주변환경에 미치는 영향에 대한 철저한 분석 및 대책 수립 등이 요구된다.

그리고 해안지역에서 염수침입을 방지하는 방안으로 이중물막이벽의 설치 방법 등이 있으며

이에 대한 지속적인 검토 분석으로 지하수를 효과적으로 이용할 수 있는 방안을 강구해야 할 것이다.

사사(Acknowledgement)

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단, 농업기반공사 및 한국수자원공사의 연구비지원(과제번호 #3-4-1)에 의해 수행되었습니다.

This research was supported by a grant(code#3-4-1) from Sustainable Water Resources Research Center, KARICO and KOWACO of 21st Century Frontier Research Program.

참고문헌

- 건설교통부, 2001, 지하수조사연보, pp31
- 건설산업조사학회(石崎勝義 외), 1980, 地下水ドブック, pp1375~1384
- 김희성, 1996, 3차원 흐름모형을 이용한 지하차수벽의 투수특성규명, 충북대학교 박사학위논문
- 농자원공단, 2000, 중국조사보고서, pp11~74
- 농어촌진흥공사, 1996a, 한국지하수총람, pp159~177
- 농어촌진흥공사, 1996b, 소유역지하댐 개발에 관한 기술개발 연구
- 농업진흥공사, 1982, 이안지하댐 조사시험 보고서
- 농업진흥공사, 1984, 이안지하댐시험사업준공보고서
- 농업진흥공사, 1985, 이안지하댐사후평가조사보고서
- 박창근, 2000, 속초시 쌍천지하댐과 그 의미, 한국수자원학회지, 제33권 6호, pp85~90
- 안응순, 이태식, 1997, 연약지반의 약액주입공법에 대한 시공성 및 경제성 연구, pp1~22
- 오기너와현(농림수산부 중부 농림토목사무소), Yokatsu subsurface dam project

부성안, 이기철, 김진성, 정교철, 고양수

- 장의웅, 정형재, 부성안, 송성호, 2001, 댐 그라우팅 설계 및 시공 실무지침서, pp3~19
Tel : 054-850-5753
- 정교철 역, 1998, 굴착공사와 지하수, 도서출판 엔지니어스, pp240~255
고양수(YSKO@kowaco.or.kr)
한국수자원공사 조사기획처 지하수사업부
대전광역시 대덕구 연축동 산6-2
Tel : 042-629-2739
- 천병식, 1998, 최신 지반주입(이론과 실제), 원기술, pp175~300
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, pp957~959
- 金森信夫, 小林 勳, 小徳 基, 2000, 中國大連市の地下ダム開發, Jour. JSIDRE, Vol.68, No11, pp1223~1228
- 今成康忠, 戸田完一, 稚野武文, 伊籾不二夫, 원위치 교반공법을 이용한 지하댐 지수벽의 시공, 토목기술(1998, 번역 기술자료), 제6권 제1호, pp31~37
- 吉田健治, 2000, 地下ダムの技術的特徴と課題について, JIID연구보고서, 제21호, pp61~74
- 原 郁南, 緒方博則, 當銘俊明, 1996, 米須地下ダ鹽水侵入量の検討, 水と土, 제106호, pp62~71
- 赤井浩一, 1983, 中國陝西省富平地下ダム試驗工事について, 土と基礎, Vol.31, No3, pp45~47
- Hanson, G., Nilsson, A., 1986, Ground-Water Dams for Rural-Water Supplies in Developing Countries, GROUND WATER, Vol.24, No4, pp497~506

부성안(booh2700@karico.co.kr)
농업기반공사 농어촌연구원 지하수연구실
425-170, 경기도 안산시 사동 1031-7
Tel ; 031-400-1855

이기철(toong1@karico.co.kr)
Tel ; 031-400-1850

김진성(jinsungk@karico.co.kr)
Tel ; 031-400-1859

정교철(jeong@andong.ac.kr)
안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과
760-749, 경북 안동시 송천동 388